УДК 621.373.826

РАБОТА ЛАЗЕРА НА ПАРАХ МЕДИ В РЕЖИМЕ ПОНИЖЕННОГО ЭНЕРГОВКЛАДА В РАЗРЯД

Ф.А. Губарев[1,2], Г.С. Евтушенко[1,2], В.Б. Суханов[2], В.Ф. Федоров[2]

[1]Томский политехнический университет
E-mail: GFAddTPU@tpu.ru
[2]Институт оптики атмосферы СО РАН. г. Томск
E-mail: qel@asd.iao.ru

Проведены исследования режимов пониженного энерговклада в разряд в лазере на парах чистой меди малой мощности. Показано, что при переключении активного элемента на меньшую рабочую емкость вводимая в разряд мощность существенно уменьшается при относительно малом снижении мощности генерации (по сравнению с обычным режимом работы). Практический КПД лазера возрос в 2,8 раза; физический – в 8,8 раза.

Введение

Лазеры на парах меди, работающие на атомных переходах с длинами волн 510,6 нм и 578,2 нм, являются наиболее мощными и эффективными импульсными лазерами на парах металлов. Они находят широкое применение в устройствах дистанционного зондирования атмосферы, прецизионной обработки материалов, в проекционных микроскопах, в медицинских системах, для накачки лазеров на красителях и др. В первых работах, посвященных лазеру на парах меди, максимальный КПД оценивался в 23 %, ожидалось получить реальное значение 10 % [1]. Однако, несмотря на более чем тридцатилетнюю историю развития лазеров на парах меди, создание высокоэффективных импульсно-периодических лазеров на парах меди (η=5...10 %) по-прежнему остается сложной задачей. Типичное значение КПД для современных лазеров на парах меди варьируется в диапазоне 0,5...1,0 %, в то время как рекордные значения не превышают 3,0 % для лазера на парах чистой меди и бромида меди [2, 3], 3,2 % – для гибридного лазера [4]. Одним из способов повышения эффективности лазера является снижение энерговклада в разряд при сохранении уровня мощности генерации. При этом мощность, вводимая в разряд, уменьшается, но эффективность возбуждения верхних рабочих уровней не снижается. В работе [5] путем математического моделирования было показано, что для эффективной накачки рабочих переходов лазера на парах меди необходимо формировать на активном элементе импульс возбуждения с крутым фронтом напряжения, обрывающийся в момент окончания импульса генерации. Максимальный

физический КПД был оценен в 10 %. Указанный режим работы активного элемента был экспериментально реализован в работе [6], эффективность преобразования электрической энергии, вводимой в разряд, в энергию генерации составила 9 %. В работе использовался составной коммутатор, который позволял осуществлять обрыв тока и, соответственно, снижать энерговклад в разряд.

Техника эксперимента

Другая реализация режима пониженного энерговклада в разряд – переключение активного элемента на меньшую рабочую емкость. В настоящей работе исследовался изготовленный в лаборатории активный элемент, представляющий собой кварцевую газоразрядную трубку (ГРТ) с рабочим каналом из высокотемпературной керамики длиной 32 см, диаметром 8 мм, при давлении буферного газа неона 4 кПа. Использовалась традиционная схема накачки с шунтирующей индуктивностью (рис. 1). Величина шунтирующей индуктивности Ls (без сердечника) составляла 0,6 мГн для всех экспериментов. Питание осуществлялось от высоковольтного источника постоянного тока DC, позволяющего изменять напряжение питания в пределах 1...10 кВ. Зарядка накопительного конденсатора C1 (C1 и C2) осуществлялась через зарядные дроссель L и диод VD и носила резонансный характер. В качестве коммутирующего элемента использовался тиратрон ТГИ1-1000/25. Частота работы лазера задавалась генератором DO (модулятором) и составляла 10 кГц. Напряжение на газоразрядной трубке измерялось с помощью омического делителя с коэффициентом деления 1/1667, ток через газоразрядную трубку – поясом Роговского с передаточной функцией U=I/43,3. Форма импульса генерации определялась с помощью вакуумного фотодиода ФЭК-22, мощность излучения измерялась калориметром ИМО-2. Осциллограммы тока, напряжения и генерации регистрировались на двухканальном цифровом осциллографе Tektronix TDS3032.

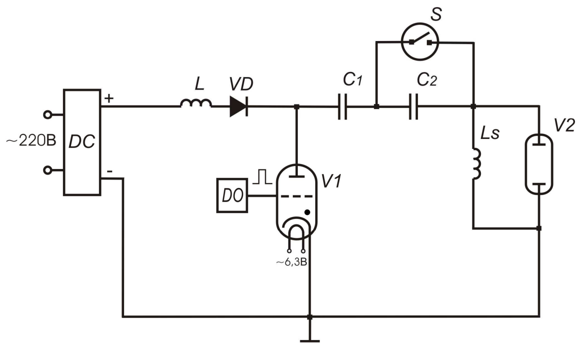


Рис. 1. *Схема возбуждения лазера на парах меди: DC – высоковольтный источник питания, DO – задающий генератор, L – зарядная индуктивность, Ls – шунтирующая индуктивность, VD – зарядный диод, C_1 – основная накопительная емкость, C_2 – дополнительная емкость, V1 – тиратрон ТГИ1-1000/25, V2 – активный элемент, S – вакуумное реле ВВ-20*

Результаты экспериментов и их обсуждение

Наряду с обычным режимом работы лазера, когда основная рабочая емкость составляла 1650 пФ (два последовательно соединенных конденсатора КВИ-3-3300 пФ), исследовались два режима пониженного энерговклада в разряд: при дополнительной емкости 680 пФ (КВИ-3-680 пФ) и 165 пФ (два последовательно соединенных конденсатора КВИ-3-330 пФ). Дополнительная емкость подключалась последовательно основной емкости. Результирующие емкости после коммутации составляли 480 пФ и 150 пФ, соответственно. Для оперативного переключения режимов работы лазера использовалось вакуумное реле ВВ-20 (ключ S). Переключение осуществлялось после разогрева трубки и выхода лазера на номинальный режим генерации. Т.к. изменение электрических параметров разряда приводит к резкому изменению температурного режима «саморазогревного» лазера, применялась методика кратковременного переключения из установившегося режима работы в режим пониженных энерговкладов. После каждого измерения система приводилась к первоначальному режиму. Осциллограммы импульсов напряжения, разрядного тока и суммарной мощности генерации на зеленой и желтой линиях приведены на рис. 2. Средняя мощность генерации при номинальной рабочей емкости составляла 350 мВт при потребляемой от выпрямителя мощности 660 Вт.

Взаимосвязь средней за период мощности генерации P и мгновенной мощности генерации P_i определяется следующим образом:

$$P = f \cdot W_i = f \cdot \int_0^{t_i} P_i dt,$$

где W_i – энергия в импульсе, t_i – длительность импульса генерации, f – частота работы лазера.

По осциллограммам импульсов генерации на рис. 2, *б*, *в*, были рассчитаны средние мощности генерации и практический КПД для соответствующих режимов работы (табл. 1). КПД рассчитывался как отношение мощности генерации к мощности, потребляемой от выпрямителя:

$$\eta_r = P/Q_r.$$

На рис. 3 приведены диаграммы мгновенной электрической мощности, построенные по осциллограммам тока и напряжения на активном элементе (рис. 2). Диаграммы иллюстрируют энерговклад непосредственно в ГРТ. Для оценки эффективности преобразования электрической энергии, вводимой в разряд за время импульса возбуждения, в энергию генерации был рассчитан физический КПД лазера (таблица), который определялся как:

$$\eta_p = W_i / G_d = \overline{P}_i / \overline{Q}_d,$$

где G_d – энерговклад в разряд за время импульса возбуждения, $\overline{Q}_d$ – усредненная по времени τ электрическая мощность, которая рассчитывалась как

произведение усредненных по времени τ тока и напряжения на ГРТ. За τ принималось время протекания разрядного тока.

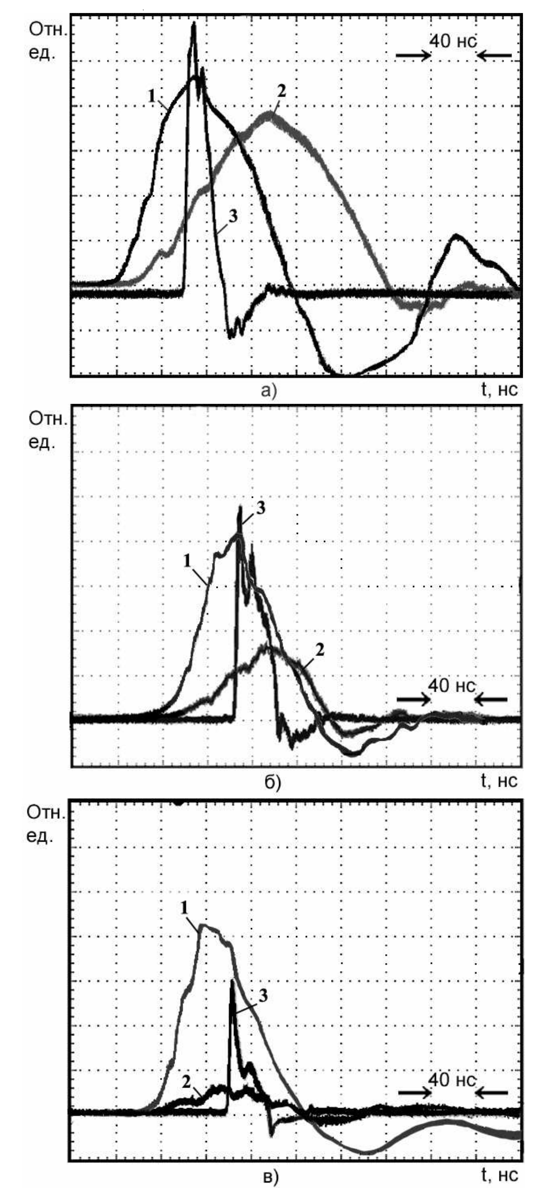


Рис. 2. *Осциллограммы: 1) импульсов напряжения, 2) тока через ГРТ и 3) суммарной мощности генерации для схемы на рис. 1: а) обычный режим, б) C_2=680 пФ, в) C_2=165 пФ. Ось ординат: напряжение – 1667 В/дел, ток – 21,65 А/дел*

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что путем снижения энерговклада в разряд можно значительно увеличить эффективность работы лазера. Предполагалось, что меньшей рабочей емкости соответствует больший практический КПД η_r, однако, полученный при C_p=480 пФ τ_r оказался выше, чем при C_p=150 пФ. Вероятно, это обусловлено увеличением доли потерь мощности на элементах схемы накачки по отношению к мощности, вкладываемой в разряд. Однако, наибольший интерес представляет влияние величины накопительной емкости на физический КПД лазера на парах меди. Следует обратить внимание, что физический КПД генерации увеличивается пропорционально уменьшению рабочей емкости и, соответственно, уменьшению энерговклада в разряд. Следовательно, снижается доля энергии, идущей на разогрев трубки и возбуждение верхних нерабочих энергетических уровней атома меди, в то время как селективность возбуждения рабочих уровней повышается. В режиме пониженного энерговклада в разряд физический КПД был увеличен в 8,8 раза. По мнению авторов, увеличение КПД не является предельным для исследуемого лазера, поскольку частота его работы была меньше оптимальной для данной апертуры активного элемента. Исследование характеристик генерации лазера на более высоких частотах не было проведено по причине нестабильности работы коммутирующего элемента при переключении на меньшую рабочую емкость.

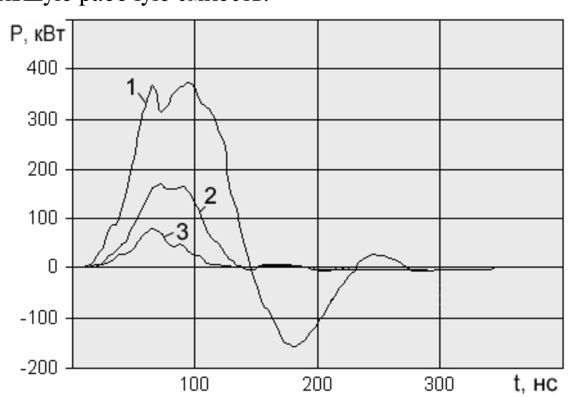


Рис. 3. *Диаграммы мгновенной мощности на активном элементе: 1) обычный режим, 2) C_2=680 пФ, 3) C_2=165 пФ*

Таблица. *Параметры работы лазера и его выходные характеристики*

Рабочая емкость, C_p, пФ	1650	480	150
Средняя мощность генерации, P, мВт	350	304	142
Энергия в импульсе генерации, E, мДж	0,035	0,0304	0,0142
Потребляемая мощность, Q_r, Вт	660	216	152
Энерговклад в ГРТ за импульс тока, G_d, мДж	34	7,9	1,6
Практический КПД, η_r, %	0,05	0,14	0,094
Физический КПД, η_p, %	0,1	0,385	0,887

Заключение

Реализованный режим пониженного энерговклада в разряд позволил повысить практический КПД лазера в 2,8 раза, в то время как физический КПД увеличился в 8,8 раза. Полученные результаты свидетельствуют о том, что для повышения эффективности работы лазера предпочтительно использовать режим пониженного энерговклада, т.е. применять в схеме накачки малую накопительную емкость. Поскольку, стационарный режим работы лазера на парах меди требует поддержания высокой температуры активной среды (~1800 К), снижение энерговклада в разряд не позволяет длительное время поддерживать саморазогревный режим рабо-

ты. Перспективным представляется исследование режимов пониженного энерговклада в разряд в лазерах на парах бромида меди, которые имеют более низкую рабочую температуру активной среды (~800 K) и менее критичны к ее изменению. Первые результаты по исследованию режима пониженного энерговклада в CuBr-лазере были представлены в работе [7]. Планируется проведение дальнейших исследований в этом направлении с использованием опыта, полученного в настоящей работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Walter W.T., Solimene N., Piltch M., Gould G. Efficient pulsed gas lasers // IEEE Journal of Quantum Electronics. – 1966. – V. 2. – № 9. – P. 474–479.
2. Бохан П.А., Герасимов В.А. Оптимизация условий возбуждения в лазере на парах меди // Квантовая электроника. – 1979. – Т. 6. – № 3. – С. 451–455.
3. David R.J., Maitland A., Little C.E. A High-Efficiency 200 W Average Power Copper HyBrID Laser // IEEE J. Quantum Electronics. – 1994. – V. 30. – № 10. – P. 2385–2390.
4. Astadjov D.N., Dimitrov K.D., Jones D.R., Kirkov V.K., Little C.E., Sabotinov N.V., Vuchkov N.K. Copper bromide laser of 120 W average output power // IEEE J. Quantum Electronics. – 1997. – V. 33. – № 5. – P. 705–709.
5. Демкин В.П., Солдатов А.Н., Юдин Н.А. Эффективность лазера на парах меди // Оптика атмосферы и океана. – 1993. – Т. 6. – № 6. – С. 659–665.
6. Солдатов А.Н., Суханов В.Б., Федоров В.Ф., Юдин Н.А. Исследование лазера на парах меди с повышенным КПД // Оптика атмосферы и океана. – 1995. – Т. 8. – № 11. – С. 1626–1636.
7. Евтушенко Г.С., Петраш Г.Г., Суханов В.Б., Федоров В.Ф., Шиянов Д.В. CuBr-лазер с пониженным энерговкладом в разряд // Квантовая электроника. – 2000. – Т. 30. – № 5. – С. 406–408.

УДК 537.521